引用格式：高树琴，胡兆民，王竑晟，等. 智慧农业助力粮食生产节本增产增效的“九步法”. 中国科学院院刊，2024, 39(1): 198-209, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230811003.
Gao S Q, Hu Z M, Wang H S, et al. Nine-Step Approach of smart agricultural helps grain production reduce costs, increase yield and efficiency. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(1): 198-209, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230811003. (in Chinese)

智慧农业助力粮食生产节本增产增效的“九步法”

高树琴[1] 胡兆民[2] 王竑晟[3] 张晓博[4] 张玉成[1*]

1 中国科学院计算技术研究所 北京 100190
2 呼伦贝尔农垦集团 呼伦贝尔 021008
3 中国科学院科技促进发展局 北京 100864
4 北京国科伏羲科技有限公司 北京 100080

摘要 粮食安全是治国理政的头等大事。新中国成立以来，高标准农田建设、农业机械化发展、农业技术提升等均为粮食增产增效作出了贡献。在当前严守18亿亩耕地红线的局势下，大水大肥等依靠农用物资投入提升粮食产量的增长效应已进入平台期，持续增产的空间有限。在信息化、智能化、物联网、大数据和人工智能等新技术快速发展的背景下，将数字经济与农业传统产业融合，发展智慧农业，将是我国粮食增产增效的新增长点。围绕粮食生产的产前、产中、产后3个阶段，针对从整地到粮食入库的全过程，文章提出了智慧农业的“九步法”，即“两精”“三变”“三减”“一用”，并分别阐述了每个环节的内涵、存在的技术瓶颈和对粮食生产节本增效的作用。最后，针对我国智慧农业发展，就大数据的获取、标准化、应用和安全提出了建议。

关键词 粮食安全，智慧农业，农业大数据，“九步法”

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20230811003
CSTR 32128.14.CASbulletin.20230811003

数字经济是继农业经济、工业经济之后的主要经济形态。2012—2021年，我国数字经济规模从11万亿元增加到45.5万亿元，占国内生产总值（GDP）的比重由20.4%增长至39.8%，成为推动经济社会高质量

*通信作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA28040000）
修改稿收到日期：2023年11月24日；预出版日期：2023年12月8日

发展的重要引擎[1]。习近平总书记在《求是》杂志发表的重要文章《不断做强做优做大我国数字经济》中指出：“推动数字经济和实体经济融合发展。把握数字化、网络化、智能化方向，推动制造业、服务业、农业等产业数字化。”

当前全球粮食安全问题日益严峻，2022年全世界约有6.9亿—7.8亿人口面临饥饿，预计到2030年，全世界仍有近6亿人口长期食物不足[2]。我国是世界上粮食进口最多的国家，2022年我国进口粮食1.5亿吨，占全国粮食总产量的21.4%。因此，我国粮食安全受国际市场影响的风险较大。作为一个14亿人口大国，我国必须确保“中国饭碗”主要装“中国粮”。以习近平同志为核心的党中央把粮食安全作为治国理政的头等大事，确立了新时代“以我为主、立足国内、确保产能、适度进口、科技支撑”的国家粮食安全战略。数字经济时代背景下，数字技术在我国农产品销售和流通环节发挥了巨大作用，而数字技术如何应用到农业生产环节，实现农业生产的精细化管理，目前多集中于点上的研究和小规模的应用，缺乏农业生产全流程的数字技术应用。因此，如何在大范围内打通农业生产的数据流、将数字经济与农业传统产业融合、让数据在农业生产环节中产生高效的价值，是发展智慧农业的前提，也是实现中国式农业现代化的一个重要命题。

1 我国传统粮食生产方式遇到持续增产瓶颈

粮食安全是国家安全的基础。新中国成立以来，我国粮食生产取得巨大成就，用不足全球9%的耕地解决了全球约20%人口的吃饭问题。推动粮食产量增加的主要因素包括农业基础设施改善、农业物质装备水平提高、农业科技进步加快和农业经营体制改革等多方面的举措。1978年改革开放以来，我国粮食单位面积产量（以下简称“单产”）由167.5千克/亩（2 527千克/公顷），提高到2021年的387千克/亩（5 805千克/公顷），翻了2.3倍；我国农业生产中化学肥料（以下简称“化肥”）投入增加了5.9倍，农药投入①增加了4.7倍（表1）。然而，我国化肥、农药的利用率仅为40%左右，未被充分吸收利用的化肥、农药造成了严重的环境污染。与此同时，我国农业用水量达到3 644.3立方米，占2021年全国用水总量的61.5%。通过分析我国1978年至今的粮食产量和化肥施用量的关系，发现两者存在极显著的相关关系（$p < 0.001$）。1978—2002年，单位化肥施用量的粮食产量呈现逐年下降的趋势，即增加化肥施用量对于提升粮食产量的作用逐渐降低；2003—2015年，我国化肥总施用量的数据仍在攀升，但是单位化肥施用量带来的粮食产量却几乎不变，也就是说随着化肥施用量的增加，粮食增产已进入平台期；2015年开始，随着国家“双减”战略的提出，虽然化肥施用总量逐年减少，但单位化肥施用量的粮食产量则出现了缓慢提升（图1）。由此可见，我国化肥的使用已经严重超标，不仅无法促进粮食持续增产，而且不能被作物吸收利用的化肥还会进入土壤及水体，造成严重的农业面源污染。

2 发展智慧农业是未来粮食节本增产增效的新增长点

美国、日本、欧洲等发达国家或地区的农业数字化技术起步早，海量农业数据的积累支撑了国家初步建立农业智能化生态体系，实现了增产提效，如原美国孟山都公司（Monsanto Company）与美国约翰迪尔公司（John Deere）合作建立了精准数字农业生态体系。目前，德国拜耳公司旗下气候公司（Climate Corporation）推出的数字农业平台（Climate

① 此处农药投入用化学农药原药产量代替。

表1 1978年和2021年我国粮食生产和农业投入对照表

Table 1 Comparison of China's grain production and agricultural inputs in 1978 and 2021

年份	粮食产量（亿吨）	耕地面积（亿亩）	耕地灌溉面积（亿亩）	农业机械总动力（万千瓦）	化学农药原药产量（万吨）	农业生产中化学肥料施用量(折纯量)（万吨）
2021年	6.8	19.2	10.4	107 764.3	249.85	5 191
1978年	3.0	14.9	6.7	11 749.9	53.3	884

数据来源：1978年耕地面积数据来源于1999年中国统计年鉴（https://www.stats.gov.cn/yearbook/indexC.htm）；2021年耕地灌溉面积数据缺失，用2020年的数据代替（https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm）；其余数据来源于2022年中国统计年鉴（https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm）

Data source: Data of cultivated land area in 1978 is from China Statistical Yearbook 1999 (https://www.stats.gov.cn/yearbook/indexC.htm). Data of irrigated area in 2021 was missing and was replaced by the data from 2020 (https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm). Remaining data are from China Statistical Yearbook 2022 (https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm)

FieldView）已服务全球超过13亿亩耕地，通过海量数据采集，帮助农民优化农田决策，从而提高土地生产力，最大限度地帮助农户降低农业生产管理强度、提高农业生产的效率、增强抵御风险的能力②。我国是粮食进口第一大国，大豆和玉米的进口量排全球前两位，合计占我国粮食进口总量的76%。我国大豆和玉米生产均存在单产低、成本高的问题。2021年，我国大豆单产（约140千克/亩）是美国（231千克/亩）的61%，成本（约781元/亩）是美国（593元/亩）的1.3倍；我国玉米单产（约507千克/亩）是美国（735千克/亩）的69%，成本（约1 149元/亩）是美国（806元/亩）的1.5倍[3]③。由此可见，我国大豆和玉米不仅单产低，且单产的成本是美国的2.1—2.2倍，节本增效的空间巨大。因此，推进中国式农业现代化，实现粮食生产中降本增产增效，是我国农业健康可持续发展无法回避的重要议题。

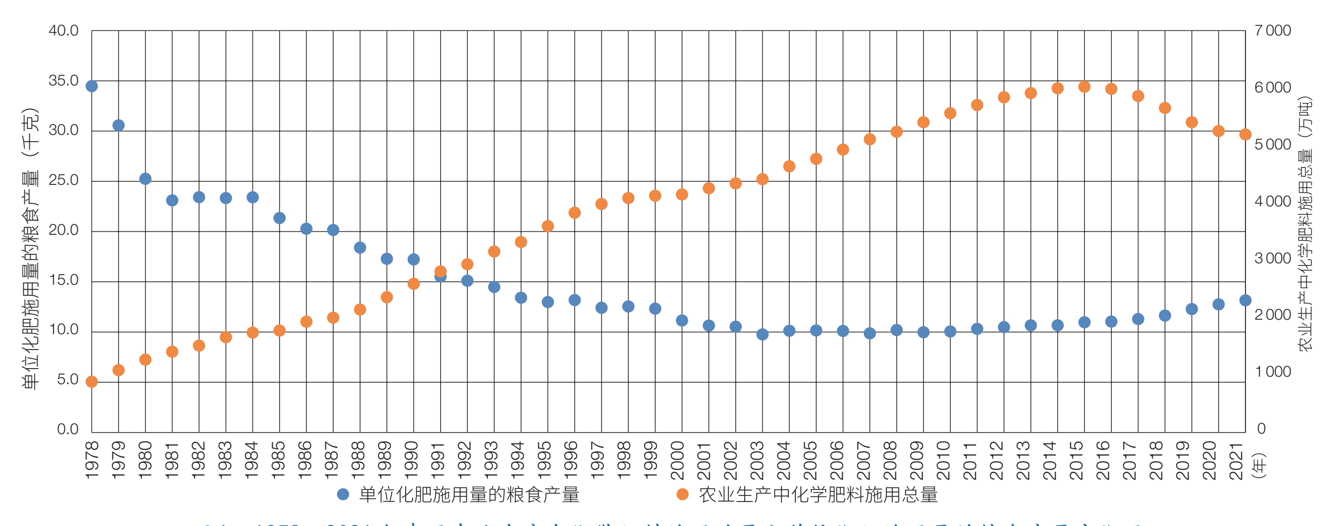


图1 1978—2021年我国农业生产中化学肥料施用总量和单位化肥施用量的粮食产量变化图

Figure 1 Total fertilizer application and grain yield of unit fertilizer application in China from 1978 to 2021

数据来源：2022年中国统计年鉴（https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm）

Data source: China Statistical Yearbook 2022 (https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm)

② Bayer's flagship digital farming product now offers export options with ability to share reports via email, text. (2023-05-17)[2023-11-29]. https://www.bayer.com/en/us/new-fieldview-capabilities-0.

③ Agricultural baseline database. (2023-11-07)[2023-11-29]. https://www.ers.usda.gov/data-products/agricultural-baseline-database/.

农业生产是一个受自然环境、生物有机体与人类社会生产活动等多种因素共同作用的复杂系统。在我国耕地资源有限的背景下，提高粮食作物单产是增加粮食产能的有效途径，农业农村部已将粮油等主要作物大面积单产提升作为粮食生产工作的头号工程。粮食单产的波动受到光、热、水等气候因素，土壤和地形等环境因素，化肥和农药等生产资料投入因素，品种改良等科技因素的影响。针对近15年玉米单产增加的因素分析研究表明，气候因素占48%，田间管理占39%[4]，可见精细化管理对提高粮食单产的作用巨大。发展智慧农业，将信息化、数字化、智能化技术应用到农业生产系统，就是要通过海量数据的获取，建立农业模型和算法，摸清作物的生长规律和对光、温、水、肥等资源的需求特点，智能化精准识别作物的病虫害，从而作出适时适量施用水肥药和播种收获时间等的管理决策，对复杂的农业生产系统进行智能化、精准化控制。通过粮食生产过程的精细化、精准化管理，提升田间管理在粮食单产增加中的作用，减弱气候变化对粮食生产的影响，实现“靠天吃饭”向“知天而作”的转变。

3 发展智慧农业的核心“九步法”

2005年中央一号文件《中共中央 国务院关于进一步加强农村工作提高农业综合生产能力若干政策的意见》中，首次提出了“加强农业信息化建设”。随后，我国围绕作物生长发育、种植管理管控、农业信息采集、质量检测等方面开展了大量工作，在农业物联网产品和技术、农业传感器、水肥一体化等方面均取得了一系列成果[5]，为农业大数据的获取提供了基础。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中明确提出“加快发展智慧农业，推进农业生产经营和管理服务数字化改造”。随着我国农村信息基础设施建设、农业规模化经营趋势、智慧农业技术进步，我国智慧农业迅速发展[6]。围绕耕地土壤、种子、水资源、肥料和农药利用等方面，科研人员开展了大量的单项技术研究或集成技术研究，部分技术环节已取得突破，并在应用示范中取得了显著效益[7]。农业生产是一个复杂的系统工程，围绕产前、产中、产后的粮食生产全链条，针对从耕整地到粮食入库的全过程，通过将碎片化的单点技术进行串联，为我国农业生产节本增产增效提供技术支撑，实现“藏粮于技”。为此，本文将控制论的概念引入农业生态系统[8]，提出了智慧农业助力农业生产的核心“九步法”，即“两精”“三变”“三减”“一用”（图2）。利用信息技术打通农业生产全链条数据流，通过农业大数据积累，开发算法和模型挖掘数据价值，建立智慧农业决策系统，并用智能农业机械装备实现精准执行系统指令。同时，智能农业机械又可在作业的同时采集数据，实现数据流的闭环。随着系统不断积累数据，进一步加强数据驱动的模型训练，使系统变得“越来越聪明”，实现精准决策，进一步提升农业科技的增产增效潜力。

3.1 “两精”：精准整地、精量播种

（1）精准整地。土壤精准耕整是提高农业水肥药利用率、促进作物生长、减少温室气体排放、提高作物产量的重要途径[9]。精准整地主要包括保护性耕作、深松和激光整地3项关键技术：保护性耕作可以减少土壤径流、增加土壤有机质、减少水分蒸发；深松可以打破犁底层，改善土壤透水透气性和团粒结构；激光整地则直接影响田间灌溉效率[7]。有研究表明，经过激光整地技术平整后的土地，能够较好解决漫灌造成的水资源严重浪费问题，比传统平整土地方式节约灌溉用水21%；水分利用效率可提高19%—22%；不仅可以充分利用有限的水资源，同时也减少了土肥流失，作物产量可提高5%—11%[10]。此外，农田通过高精度平整后，还可以带来附加效益，如可减少灌溉沟渠和田埂的占地面积使水田土地利用率提高3%—6%[9]。此外，根据土壤类型和种植作物种类的不

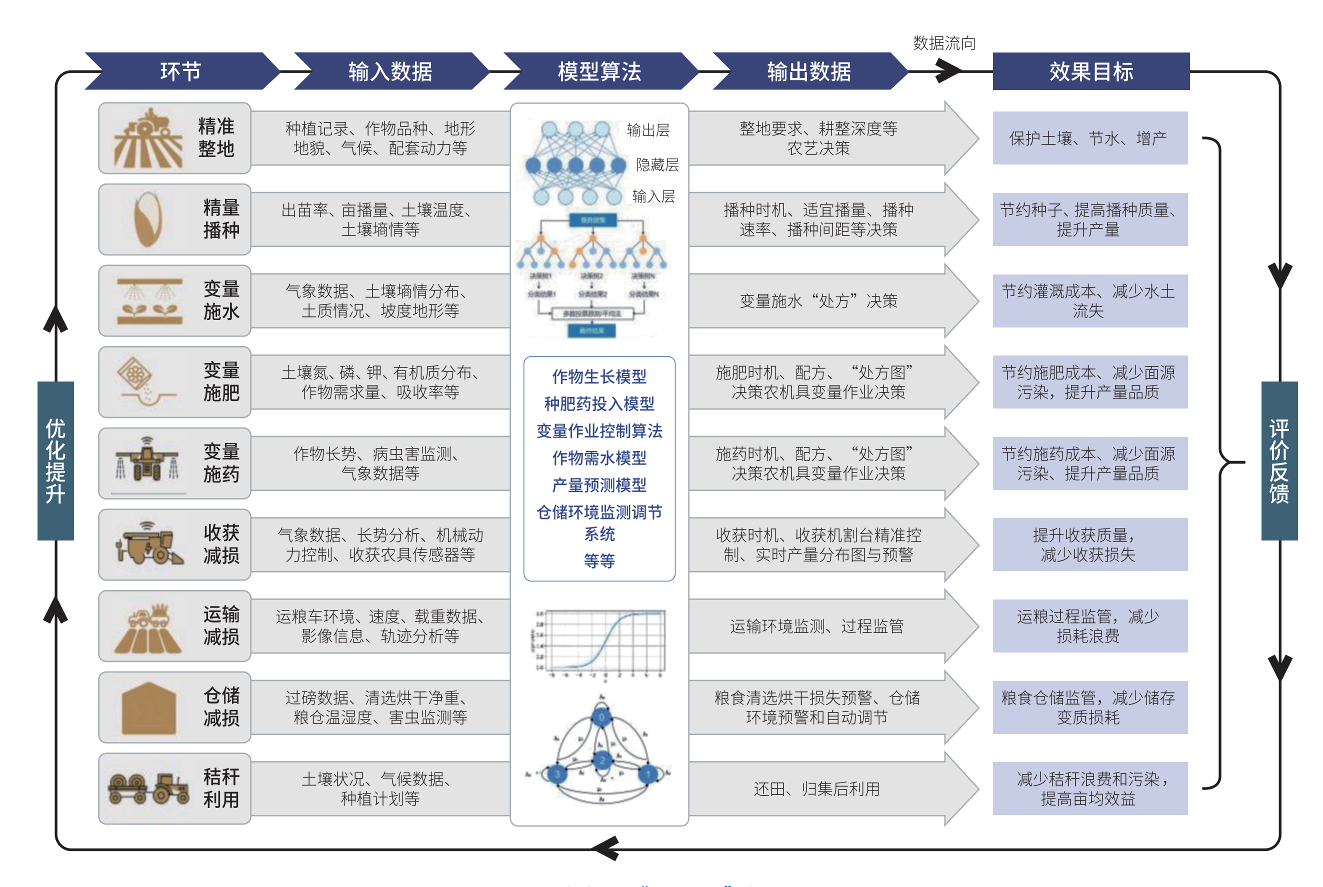


图2　智慧农业“九步法”概念框架图

Figure 2　Conceptual framework of Nine-Step Approach of smart agriculture

同，整地深度和耕整方式要求也不一致，通过信息技术获取不同土壤类型特点和不同作物种子萌发、生长的规律，为精准整地提供个性化定制方案，增强土壤的保水保肥能力，促进作物种子萌发和生长。

（2）精量播种。作物的播种质量和产量息息相关。如果播种疏密不均，会导致生长无序、通风透气性差、营养获取不均衡、易受病虫害侵袭等问题。随着播种机械的技术进步，实现精量播种成为可能，而精量播种的前提是确定作物品种的适宜播量和最佳行距、株距等。通过构建群体尺度的作物生长模型，利用信息空间模拟不同密度作物的光合效率和生长发育规律，将为作物精量播种提供支撑。研究表明，精量播种一方面可提高作物播种质量，确保苗齐、苗壮，营养合理，个体发育健壮，群体长势均衡，进而实现单产提升；另一方面可以节省或完全省去间苗时间，节约人力和能源成本；此外，精量播种还可以节约种子用粮，避免种子浪费。玉米通过精量播种可以节约种子2.7—3.0千克/亩（40—45千克/公顷）[13]，按我国玉米播种面积估算，相当于可节约玉米用种量172万—194万吨。

3.2 “三变”：变量施水、变量施肥、变量施药

水肥药是农业生产重要的基础物质，在保障作物高产稳产和粮食安全中发挥了重要作用。农业可持续发展的核心是保护水土资源及农业生态环境。因此，提高农业资源利用水平和效率、加大农业生态保护建设力度是主要举措。我国是世界上13个贫水国家之一，2022年，我国农业用水量达3 781.3亿立方米，占全国用水总量的63%[12]。我国也是化肥和农药使用大国，我国平均每亩地的化肥施用量是美国的2.6倍；平均每亩地的农药施用量是世界平均水平的2.5倍。

化肥和农药的过量施用，一方面造成农业生产成本增加，另一方面造成农业面源污染，不仅影响农产品的质量，还会威胁农业生态环境安全。为此，原农业部2015年印发了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》，通过测土配方施肥、有机肥料与微生物肥料等新型肥料替代使用、病虫害绿色防控技术实施等手段，我国2021年化肥和农药的施用量比2015年分别减少了13.8%和16.8%。2022年，农业农村部印发了《到2025年化肥减量化行动方案》和《到2025年化学农药减量化行动方案》，提出进一步开展化肥农药减施不减产行动。如何实现减施不减产，一方面要摸清作物生长的水肥需求规律、开展作物病虫害的智能化监测，另一方面要摸清土壤水分和养分的本底资源情况，二者结合生成变量作业的“处方图”。当前，随着高通量作物表型监测、基于深度学习的病虫害识别、伽马能谱仪土壤快速无损检测等新技术的发展，为数据驱动的作物生长模型构建、土壤快速全面体检提供了基础，也为变量作业“处方图”的智能化生成提供了可能。结合气象信息，还可对最佳施肥和喷药的时间提出建议。根据作物需求进行水肥药的精准施用，是减少水肥药用量、增加作物产量、提升作物品质的重要途径。

（1）变量施水。传统农业生产的均匀灌溉方式可能出现局部灌溉过量或不足的情况，造成水资源和能源的浪费，降低了作物对水的利用效率。同时，过量施水还可能引起地表径流或土壤水的深层渗漏，可能污染地表水及地下水。大型喷灌机的研发为变量施水技术提供了作业载体[13]，室内模拟或田间试验研究表明，变量灌溉可节水约4%—7%[14]，个别田间小区试验甚至达到节水53%的效果[15]。

（2）变量施肥。我国化肥利用率约40%，比美国、欧洲等发达国家低10%—25%，化肥的过量施用会造成耕地板结、土壤酸化等问题。国内外变量施肥技术主要分为2类，一类是基于“处方图”的变量施肥，一类是实时监测的变量施肥；主要包含预先生成变量作业“处方图”或实时采集土壤肥力信息、施肥决策系统和变量作业机具3个关键环节[16]。我国东北黑土区的研究表明，采用玉米精准施肥模型，变量施肥方案可比传统施肥方案节约化肥5%—10%，同时玉米增产6%—10%[17]。

（3）变量施药。病虫草害信息的快速获取和精准识别是变量施药的关键，相关设备包括地面喷药机械和航空喷药机械2类。近年来，航空植保技术的逐渐应用，特别是无人机等具有飞行速度快、喷洒效率高、人工成本低等优点，农作物病虫害防治作业效率提高了15%—35%，生产成本降低了约7元/亩（105元/公顷）[18]，对于突发性病虫害具有较好的防治效果，增强了抗风险能力。

3.3 “三减”：收获减损、运输减损、仓储减损

粮食产后损失是一个全球性问题，节粮减损是保障粮食安全的重要举措。2021年，在我国倡议下，农业农村部、国家发展和改革委员会、国家粮食和物资储备局、山东省人民政府共同举办了国际粮食减损大会，习近平总书记在贺信中指出，“粮食安全是事关人类生存的根本性问题，减少粮食损耗是保障粮食安全的重要途径”，粮食产后损失不仅造成了粮食数量的减少，而且浪费了生产粮食消耗的水土资源、能源动力、劳动力，以及化肥、农药等生产资料。

联合国粮农组织将粮食在收获后至供应链消费环节之前被损失掉的部分称为粮食损失指数（FLI），主要包含运输、储存和加工3个方面。据估测，全球的粮食损失指数约为13.8%④，谷物和豆类的粮食损失指数为8%左右[19]。本文在粮食产后环节仅讨论从收获

④ 此处粮食指包含谷物、豆类、水果蔬菜、根茎、块茎、油料作物、动物产品和鱼产品的广义概念。

到储藏的过程，不包含加工和消费方面，具体划分为收获（田间收获）、运输（从田间运输到粮食存储地）、储藏（干燥后入库储藏）3个环节。有研究表明，我国三大主粮作物水稻、小麦、玉米在收获、运输、储藏的产后损失率平均为7.9%。其中，储藏环节的损失最高，损失率达到4.5%，占产后总损失率的50%以上；其次是收获环节，损失率为2.5%；运输环节的损失率为0.9%[20]。我国三大主粮作物的产量占我国粮食总产量的91%，基本可以反映我国粮食产后损失的总体状况。2022年，我国粮食总产量为68 653万吨，按此推算，粮食产后损失量约为5 424万吨，当年的粮食平均产量为387千克/亩，折算后相当于损失了1.4亿亩耕地产量的粮食。

（1）收获减损。粮食收获环节的损耗主要与收获时间、气候条件和收获方式等因素有关。通过构建包含作物、气候、土壤等模块的农业模拟器，根据气候条件、作物种类和作物成熟度，可为获取最佳收获时机提供智能化决策建议；同时，通过监测作物收获的实时产量，可以及时预警并调整至最佳收获方式。我国三大主粮作物水稻、小麦、玉米的机收率分别达到了95%、98%、80%[21]。通过加强智能化专用联合收获机的研发和应用、制定标准的收获作业规范、加强农业机械操作手的培训等，可提高收获质量，降低收获损耗[22]。

（2）运输减损。运输环节的损耗不仅包括粮食重量的减少，也包括粮食质量的下降。重量损耗主要与包装破损、包装不当、装卸遗留等因素有关[23]；而运输过程遭受雨淋或运输环境温度控制不当，均会引起粮食品质下降，甚至发生霉变，造成损失。通过运输环境的自动化监测和智能化调控，运输车辆载重的全过程监管，可有效减少运输环节的损耗。

（3）仓储减损。储藏环节的损耗受粮食烘干和储存基础设施的影响较大，通过建立粮食收运储的信息化管理系统、仓储环境的智能化监测和调节系统，可实现粮食清选烘干损失量、仓储环境的实时预警，为减损提供信息化支撑。有研究表明，通过采用作物联合收获机收获、散粮集装箱运输、机械化干燥、粮食储备库替代农户传统储粮方式等措施，我国粮食产后损失可降低至4%以下[20]，减损量折算为耕地面积相当于新增“无形良田”0.7亿亩。如果收获、运输、仓储3个环节均实现信息化，进行实时监测预警，将进一步减少粮食产后损失。

3.4 “一用”：秸秆利用

秸秆的产生同粮食一样，是作物光合作用的产物，也需要消耗水土资源，且秸秆约占作物地上生物量的50%以上，是农业生态系统中宝贵的生物质资源。因此，秸秆的综合利用是农业绿色高质量发展的重点任务，关乎农业可持续发展和生态环境保护，受到各国高度重视。据估算，我国农作物秸秆资源量约为7.7亿吨[24]，是粮食总产量的1倍多。作物秸秆的利用方式主要包括肥料化、饲料化、能源化、基料化和原料化5类。据农业农村部发布的《全国农作物秸秆综合利用情况报告》显示，2021年，我国作物秸秆利用量达到6.47亿吨，合计综合利用率达88.1%。其中，秸秆还田量约为4亿吨，占62%，主要包括玉米、水稻、小麦秸秆；秸秆饲用化利用量为1.32亿吨；燃料化利用量为6 000多万吨；基料化、原料化利用量约为1 200万吨。可见，我国目前的秸秆利用仍然以还田为主，但受限于技术不完全成熟，秸秆还田后可能会出现腐解不完全从而影响来年作物出苗和生长，或是腐解过程中与作物竞争肥水资源等问题[25]。通过加强秸秆综合利用技术研发，未来可开辟秸秆综合利用的新途径，推动秸秆资源利用的多样化和高值化。

4 关于我国发展智慧农业的建议

发展智慧农业的前提是以大数据为基础。大数据的本质是海量、多维度、多形式的数据，具有海量的数据规模、快速的数据流转、多样的数据类型和价值

密度低四大特征。只有将大数据和人工智能结合起来，利用深度学习和强化学习等算法，建立模型，辅助或代替人工决策，才能够将大数据利用起来，发挥其应用价值。因此，智慧农业的发展，需要打通数据获取、数据传输、数据存储、数据处理、算法研发、模型构建等一系列过程。为此，针对大数据的获取、标准化和应用，建议加强如下4个方面的工作，加快农业智能化进程，助力实现中国式农业现代化。

4.1 加强智能农业机械的研发和应用，将农业机械变成“数据爬虫”

我国拥有18亿亩耕地，如何快速、低成本获取全面的、动态的地块级粮食生产全流程大数据是个难题。作物耕种管收都需要农业机械的参与，如果将农业机械变成数据采集载体，则可以在农业生产全过程获取精确到地块级别的数据。世界上先进的智能农业机械可搭载农田土壤信息传感器、作物生长及病虫害监测传感器、作业环境传感器、农业机械装备作业参数传感器等，全方位采集发动机、位置、土壤、环境、作物等信息。我国拥有4 000多种农业机械产品，农业机械总动力达到10.78亿千瓦，全国农作物耕种收综合机械化率72%，三大主粮作物小麦、水稻、玉米的耕种收综合机械化率分别达到97.3%、85.6%和90%⑤，为通过农业机械获取数据提供了可能。然而，当前我国高端农业机械主要依赖进口，且自主研发的农业传感器数量不到世界的10%。加快构建我国自主的第3代农业机械创新体系，从“端、网、云、数、用”5个层面进行信息技术与农业生产的融合，实现数据采集、立体通信、大数据挖掘与农业机械自动化作业于一体，将农业机械发展为数据采集和精准作业同时进行的执行载体[26]。未来通过智能农业机械的应用，将农业机械变成“数据爬虫”，在作业过程中采集农田土壤、作物生长、病虫害、气象等信息，实现农业生产全流程数据的自动化采集，建立农业大数据库并实现动态更新，为智慧农业决策系统做好数据储备。

4.2 建立农业数据采集标准，打通农业“数据孤岛”

围绕粮食生产耕种管收全过程，针对影响粮食产量和品质的土壤、水分、气候、作物品种习性等因素进行数据采集，是构建智慧农业决策系统的基础。影响农业生产的水、土、气、生四大类指标存在数据格式和类型不同、数据来源不一致等问题，这些多源异构数据通常以不同结构和语义表示，无法直接融合和共享。因此，应建立农业大数据共性平台底座，汇聚不同区域的农业信息，打通农业“数据孤岛”。① 加强低成本通信系统研发，突破全要素数据采集通信网络开发平台、农业通信关键技术，形成天空地一体化技术融合的农业专用通信系统终端产品；② 针对处理海量数据技术瓶颈，开展农业生产全要素数据存储与清洗平台研发，突破以分布式存储技术、分布式数据库技术、对象存储技术为基础的分层混合存储体系的农业数据处理关键技术，形成以数据存储处理为核心的国家级农业大数据算力中心；③ 建立农业生产全流程的数据采集标准，确保采集结果的可比性、可兼容性、可集成性和连贯性[27]。

4.3 打造农业模拟器，建立智慧农业决策系统

农业大数据的核心是数据挖掘，必须与人工智能结合才能发挥数据价值。孙凝晖等[28]基于黑土地保护提出了农业模拟器的概念，拟通过理论研究和实验科学将“数值+数据+智能”技术耦合成一个在线迭代的有机整体，构建科学研究的第五范式。农业模拟器主要包括观察、判断、决策、执行（OODA），这4个步

⑤ 2021年全国农业机械化发展统计公报. (2022-08-17)[2023-11-29]. http://www.njhs.moa.gov.cn/nyjxhqk/202208/t20220817_6407161.htm.

骤同样适用于智慧农业。多源异构的农业大数据经过各种分析算法进行比较、聚类和分类归纳，将采集获得的土壤、作物、环境等要素数据搬到信息空间进行模拟分析，建立数据和模型的关系，借助智能装备构建农业生产OODA闭环正反馈系统，突破当前孤立、线性、滞后的农业模型缺陷，打通农业数据流，在信息空间完成模型的训练并进行快速迭代，从而对已有数据进行分析判断，对未知数据进行预测，实现智慧农业决策系统更准确快捷，进而替代传统专家决策的方式。

4.4 制定农业数据管理规范，加强农业数据安全监管

随着信息技术的发展，数据安全已成为事关国家安全与社会经济发展的重大问题，农业数据安全是国家粮食安全的重要组成部分。2021年9月1日，我国关于数据安全的首部律法《中华人民共和国数据安全法》正式实施。美国前国务卿基辛格曾说过："谁控制了粮食，谁就控制了所有的人。"作为世界第一大粮食出口国，美国一直把粮食作为战略武器，实施粮食—能源、粮食—金融、粮食—贸易、粮食—科技等"粮食战争"[29]。受气候变化、政治冲突、经济萎缩等原因，世界粮食体系越发脆弱，2022年，约9亿人处于重度粮食不安全状况，占全世界人口的11%[2]。在农业信息化、智能化快速发展的背景下，面对国际粮食市场震荡的形势，加强农业数据安全监管势在必行。当前，我国高端农业机械、先进的农业传感器大部分来源于进口，存在农业数据安全泄漏的极大风险。因此，一方面应加大国内自主知识产权的高端智能农业机械和农业传感器研发，加快替代进口产品；另一方面，应制定农业数据采集、传输、存储、访问等管理制度和规范，加强数据要素治理，确保农业大数据安全，避免农业数据泄漏造成的被动局面，将粮食安全牢牢握在自己手中。

参考文献

1 中国信息通信研究院. 中国数字经济发展报告(2022年). 北京: 中国信息通信研究院, 2022.
China Academy of Information and Communications Technology. Report on the Development of China's Digital Economy (2022). Beijing: China Academy of Information and Communications Technology, 2022. (in Chinese)

2 FAO, IFAD, UNICEF, et al. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023—Urbanization, Agrifood Systems Transformation and Healthy Diets across the Rural-Urban Continuum. Rome: FAO, 2023.

3 国家统计局农村社会经济调查司. 2022年中国农村统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2022.
Department of Rural Surveys, National Bureau of Statistics. China Rural Statistical Yearbook 2022. Beijing: China Statistics Press, 2022. (in Chinese)

4 Rizzo G, Monzon J P, Tenorio F A, et al. Climate and agronomy, not genetics, underpin recent maize yield gains in favorable environments. PNAS, 2022, 119(4): 1-6.

5 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究. 智慧农业, 2019, 1(1): 1-7.
Zhao C J. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture. Smart Agriculture, 2019, 1(1): 1-7. (in Chinese)

6 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望. 中国农业文摘—农业工程, 2021, 33(6): 4-8.
Zhao C J. Current situations and prospects of smart agriculture. Agricultural Science and Engineering in China. 2021, 33(6): 4-8. (in Chinese)

7 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1-11.
Luo X W, Liao J, Hu L, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 1-11. (in Chinese)

8 Huang Y B, Zhang Q. Agricultural Cybernetics. Berlin: Springer, 2021.

9 Jat M L, Chandna P, Gupta R, et al. Laser Land Leveling: A Precursor Technology for Resource Conservation// Rice-

Wheat Consortium Technical Bulletin Series 7. New Delhi: Rice-Wheat Consortium for the Indo-Gangetic Plains, 2006.

10 Naresh R K, Singh S P, Misra A K, et al. Evaluation of the laser leveled land leveling technology on crop yield and water use productivity in Western Uttar Pradesh. African Journal of Agricultural Research, 2014, 9(4): 473-478.

11 苑严伟, 张小超, 吴才聪, 等. 玉米免耕播种施肥机精准作业监控系统. 农业工程学报, 2011, 27(8): 222-226.
Yuan Y W, Zhang X C, Wu C C, et al. Precision control system of no-tillage corn planter. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(8): 222-226. (in Chinese)

12 中华人民共和国水利部. 2022 年中国水资源公报. 北京: 中华人民共和国水利部, 2023.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin 2022. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2023. (in Chinese)

13 赵伟霞, 李久生, 栗岩峰. 大型喷灌机变量灌溉技术研究进展. 农业工程学报, 2016, 32(13): 1-7.
Zhao W X, Li J S, Li Y F. Review on variable rate irrigation with continuously moving sprinkler machines. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (13): 1-7. (in Chinese)

14 Hedley C B, Bradbury S, Ekanayake J. Spatial irrigation scheduling for variable rate irrigation. Proceedings of the New Zealand Grassland Association, 2010, 72: 97-102.

15 Blonquist J M, Jones S B, Robinson D A. Precise irrigation scheduling for turfgrass using a subsurface electromagnetic soil moisture sensor. Agricultural Water Management, 2006, 84: 153-165.

16 李圳鹏, 梁春英, 李普, 等. 精准施肥技术研究现状和展望. 热带农业工程, 2022, 46(3): 47-50.
Li Z P, Liang C Y, Li P, et al. Research status and outlook of precision fertilization technology. Tropical Agricultural Engineering, 2022, 46(3): 47-50. (in Chinese)

17 于合龙, 陈桂芬, 赵兰坡, 等. 吉林省黑土区玉米精准施肥技术研究与应用. 吉林农业大学学报, 2008, 30(5): 753-759.
Yu H L, Chen G F, Zhao L P, et al. Study and application of maize precision fertilization technology in Black Soil of Jilin Province. Journal of Jilin Agricultural University, 2008, 30 (5): 753-759. (in Chinese)

18 段立蹄, 刘洋洋, 茹煜. 植保无人机变量施药监测技术研究发展与展望. 中国农机化学报, 2018, 39(6): 108-113.
Duan L T, Liu Y Y, Ru Y. Research development and prospect of plant protection UAV aerial application monitoring technology. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(6): 108-113. (in Chinese)

19 FAO. The State of Food and Agriculture 2019—Moving forward on Food Loss and Waste Reduction. Rome: FAO, 2019.

20 高利伟, 许世卫, 李哲敏, 等. 中国主要粮食作物产后损失特征及减损潜力研究. 农业工程学报, 2016, 32(23): 1-11.
Gao L W, Xu S W, Li Z M, et al. Main grain crop postharvest losses and its reducing potential in China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(23): 1-11. (in Chinese)

21 王超, 王韵弘, 赵天爱. 2022 年粮食作物机械化进展情况. 农机科技推广, 2023, (1): 9-13.
Wang C, Wang Y H, Zhao T A. Progress in mechanization of food crops in 2022. Agriculture Machinery Technology Extension, 2023, (1): 9-13. (in Chinese)

22 马权. 玉米机械化收获作业操作规程及粮食减损技术. 农机使用与维修, 2023, (3): 99-101.
Ma Q. Operating procedures for mechanized harvesting of corn and the technology of reducing corn loss. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2023, (3): 99-101. (in Chinese)

23 魏祖国, 尹国彬, 邸坤. 我国粮食物流运输损失评估及减损对策. 粮油仓储科技通讯, 2016, 32(2): 55-56.
Wei Z G, Yin G B, Di K. Evaluation of loss of grain logistics transportation in China and countermeasures of loss reduction. Grain and Oil Storage Technology, 2016, 32(2): 55-56. (in Chinese)

24 杨传文, 邢帆, 朱建春, 等. 中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力. 环境科学, 2023, 44(2): 1149-1162.
Yang C W, Xing F, Zhu J C, et al. Temporal and spatial distribution, utilization status, and carbon emission reduction potential of straw resources in China. Environmental Science, 2023, 44(2): 1149-1162. (in Chinese)

25 吕开宇, 仇焕广, 白军飞, 等. 中国玉米秸秆直接还田的现

状与发展. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(3):171-176.

Lv K Y, Qiu H G, Bai J F, et al. Development of direct return of corn stalk to soil: Current status, driving forces and constraints. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(3): 171-176. (in Chinese)

26 孙凝晖, 张玉成, 石晶林. 构建我国第三代农机的创新体系. 中国科学院院刊, 2020, 35(2): 154-165.

Sun N H, Zhang Y C, Shi J L. Build innovation system of third generation of agricultural machinery in China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(2): 154-165. (in Chinese)

27 姚艳敏, 白玉琪. 农业大数据标准体系框架研究. 农业大数据学报, 2019, 1(4): 76-85.

Yao Y M, Bai Y Q. A framework for agricultural big data standards. Journal of Agricultural Big Data, 2019, 1(4): 76-85. (in Chinese)

28 孙凝晖, 张玉成, 王竑晟, 等. 农业模拟器:用智能技术打通黑土地保护的数据流. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1165-1174.

Sun N H, Zhang Y C, Wang H S, et al. Agricultural simulator: Using intelligent technology to get data flow for black land protection. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1165-1174. (in Chinese)

29 赵丽丽, 杨多贵. 粮食战争:美国霸权世界的秘密武器. 科技促进发展, 2010, 11: 24-29.

Zhao L L, Yang D G. The grain war: The secret weapon of U.S. hegemony. Science & Technology for Development, 2010, 11: 24-29. (in Chinese)

Nine-Step Approach of smart agricultural helps grain production reduce costs, increase yield and efficiency

GAO Shuqin[1] HU Zhaomin[2] WANG Hongsheng[3] ZHANG Xiaobo[4] ZHANG Yucheng[1*]

（1 Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 Hulun Buir State Farm, Hulun Buir 021008, China;

3 Bureau of Science and Technology for Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;

4 Beijing Guoke Fuxi Technology Co. Ltd., Beijing 100080, China）

Abstract Food security is a top priority in national governance. Since 1949, high-standard farmland construction, agricultural mechanization development, and agricultural technology promotion have all contributed to the grain production. To ensure grain security, China has drawn a “red line” of 1.8 billion mu (about 120 million hectares) as the official minimum of arable land. At the same time, increasing the investment of capital goods such as fertilizer and pesticides can no longer produce more food. Due to the extensive farming method in the past, the continuous increase in total grain output becomes difficult in the future. With the rapid development of advanced technologies such as informatization, intelligence, Internet of Things, big data and artificial intelligence, fine management of agricultural production can be achieved. Through the integration of digital economy and traditional agricultural industries, developing smart agriculture will provide possibilities for increasing food production. Focusing on the three stages of grain production (including pre-, during- and after-production), this study puts forward the Nine-Step Approach of smart agriculture, namely two refinements, three changes, three reductions, and one use. For each step, the connotation, the existing technical bottleneck, and the potential of future improvement are discussed. In addition, suggestions for further development of smart agriculture are made from four perspectives, namely, data collection, data standardization, data applications, and data security.

Keywords food security, smart agriculture, big data in agricultural, Nine-Step Approach

高树琴 中国科学院计算技术研究所高级工程师。主要研究领域：智慧农业，智能育种。E-mail: gaoshuqin@ict.ac.cn

GAO Shuqin Senior Engineer of Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences (CAS). Her research focuses on smart agriculture, and intelligent breeding. E-mail: gaoshuqin@ict.ac.cn

张玉成 中国科学院计算技术研究所正高级工程师。主要研究领域：智能农业机械，复杂农业系统控制理论与方法。E-mail: zhangyucheng@ict.ac.cn

ZHANG Yucheng Professorate Senior Engineer of Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on intelligent agricultural machinery, and control theory and method of complex agricultural system. E-mail: zhangyucheng@ict.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author